

## ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПОСЕРЕДКОВАНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСОВИХ І ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛІНІЙНОГО ОБ'ЄКТА НА ІМІТАЦІЙНІЙ МОДЕЛІ

На основі розробленої імітаційної моделі та проведеного моделювання показано, що опосередковані методи дозволяють одержати достатню для практичного використання точність вимірювання системних характеристик ліній автоматики та зв'язку.

На основе разработанной имитационной модели и проведенного моделирования показано, что опосредствованные методы позволяют получить достаточную для практического использования точность измерения системных характеристик линий автоматики и связи.

On the basis of the developed imitating model and the carried out modeling it is shown, that using developed method allow to receive sufficient for practical use accuracy of system characteristics measurements of automatics and communication lines.

### Вступ

Безпечна й ефективна робота залізничного транспорту багато в чому залежить від достовірності й своєчасності передачі інформації, що на фізичному рівні визначається якістю ліній передачі. Для виявлення відхилень параметрів ліній залізничної автоматики й зв'язку від нормативних, їх піддають періодичному огляду й контролю основних параметрів [1,2]. Спотворення при передачі гармонійних сигналів у провідних лініях автоматики й зв'язку характеризують такими параметрами як власне або робоче загасання, відносні фазові зрушення, власні (характеристичні) і робочі фазові коефіцієнти, абсолютний і відносний груповий час проходження. Умови передачі багаточастотних сигналів оцінюють амплітудно-частотною й фазо-частотною характеристиками [2].

Недоліком існуючих пристроїв контролю параметрів ліній залізничної автоматики й зв'язку є недостатня кількість вимірюваних параметрів в автоматичному режимі, можливість проведення вимірів тільки у вільних лініях (тобто в технологічні вікна), що ускладнює своєчасне виявлення деградації параметрів ліній зв'язку нижче допустимого рівня.

Розглянуті недоліки можна усунути при застосуванні для контролю параметрів ліній шумоподібного сигналу. Метод дозволяє проводити контроль і діагностування ліній безупинно в процесі їхньої роботи з виміром амплітудно-частотної й фазочастотної характеристик.

### Мета роботи

Метою проведених досліджень є розробка методу автоматичного контролю й діагносту-

вання ліній зв'язку й автоматики із застосуванням шумоподібного сигналу.

Для досягнення поставленої мети в роботі проведено порівняльне дослідження опосередкованих методів вимірювання часових і частотних характеристик лінійного об'єкта на імітаційній моделі.

### Імітаційна модель

З теорії сигналів відома можливість вимірювання системних характеристик лінійного об'єкта широкосмуговими сигналами опосередкованими методами. Серед опосередкованих методів вимірювання зазначеними сигналами відомі кореляційний метод, спектральний метод і спектрально-статистичний [3].

Поняття про кореляційну функцію. В інформаційно-вимірювальних системах доводиться порівнювати сигнали з метою виявити залежність або подібність їх між собою. Кількісну оцінку залежності двох сигналів  $u(t)$  і  $v(t)$  дає взаємна кореляційна функція (ВКФ)

$$R_{uv}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-0,5T}^{+0,5T} u(t) \cdot v(t - \tau) dt. \quad (1)$$

Ступінь кореляції розділених проміжком часу  $\tau$  значень одного й того ж сигналу  $u(t)$  визначає автокореляційна функція (АКФ), яку в подальшому будемо скорочено називати кореляційною:

$$R_{uu}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-0,5T}^{+0,5T} u(t) \cdot u(t - \tau) dt. \quad (2)$$

Існують прилади, за допомогою яких можна

вимірювати ВКФ і АКФ. Вони називаються корелометрами. Схема вимірювача кореляції в режимі вимірювання АКФ показана на рис. 1.

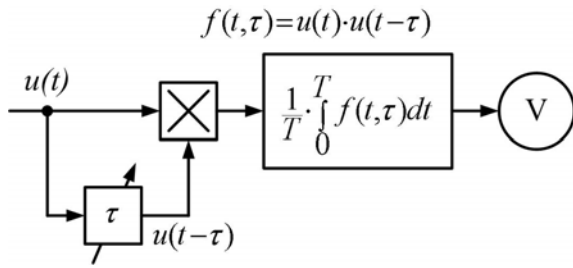


Рис. 1. Схема вимірювача кореляції

Суть кореляційного методу в тому, що вимірювана взаємно-кореляційна функція (ВКФ)  $R_{xy}(\tau)$  об'єкта дає оцінку  $\hat{p}(t)$  імпульсної характеристики  $p(t)$  вимірювального об'єкта при умові, що автокореляційна функція (АКФ)  $R_{xx}(\tau)$  вимірювального сигналу  $x(t)$  може бути описана  $\delta$ - функцією  $\delta(t)$ , тобто

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} y(t)x(t-\tau)d\tau = \int_0^{\infty} R_{xx}(\tau-\theta)p(\theta)d\theta. \quad (3)$$

З виразу (3), відомого в кібернетиці як формула Вінера–Хопфа, при  $R_{xx}(\tau-\theta) = \sigma_x^2\delta(\tau-\theta)$  одержуємо

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} \sigma_x^2\delta(t-\tau)p(\theta)d\theta = \sigma_x^2p(\tau) \quad (4)$$

або остаточно

$$p(\tau) = \frac{1}{\sigma_x^2} \cdot R_{xy}(\tau). \quad (5)$$

Перехідну характеристику  $h(t)$  системи одержують інтегруванням імпульсної характеристики

$$h(t) = \int_0^t p(\tau)d\tau. \quad (6)$$

Імпульсну характеристику можна також використати для обчислення частотних характеристик системи з частотної передатної функції, яку одержують з імпульсної характеристики прямим дискретним перетворенням Фур'є:

$$\dot{W}(f_k) = T \sum_{n=0}^{N-1} p(nT) \cdot \exp(-j2\pi kn/N), \quad (7)$$

де  $T$  – інтервал дискретизації;  
 $nT$  – час спостереження.

З (7) одержуємо амплітудно-частотну (АЧХ) і фазово-частотну (ФЧХ) характеристики системи:

$$A(f_k) = |\dot{W}(f_k)|, \quad \varphi(f_k) = \arg \dot{W}(f_k). \quad (8)$$

Розглянутий розрахунковий алгоритм кореляційного методу відображений у структурній схемі системи вимірювання на рис. 2. Для дослідження точності вимірювання схема доповнена блоком обчислення еталонних характеристик об'єкта і блоком порівняння виміряних характеристик з еталонними.

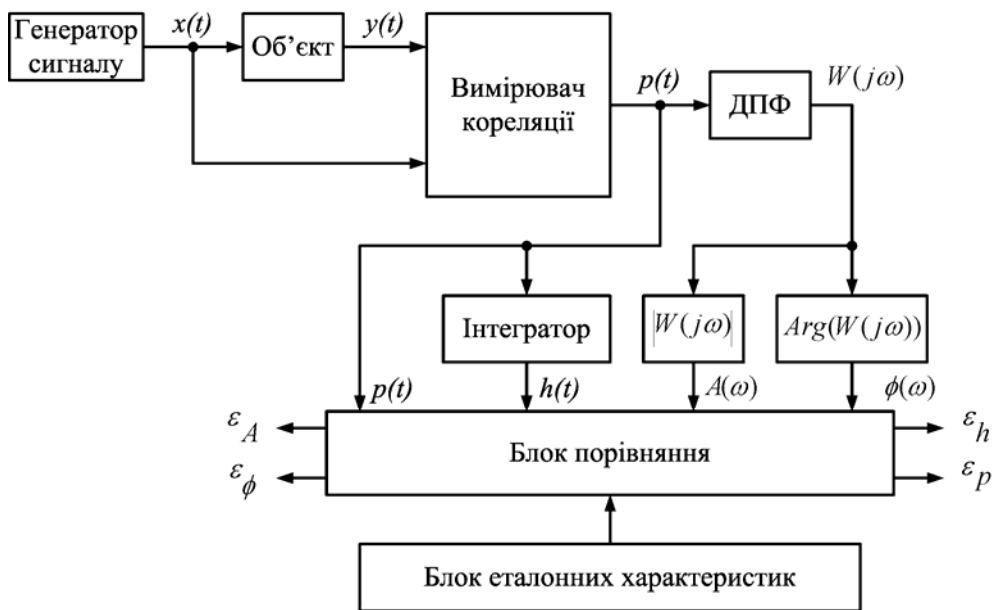


Рис. 2. Структурна схема імітаційної моделі вимірювальної системи

Спектральний метод вимірювання системних характеристик оснований на визначенні частотної передатної функції об'єкта безпосередньо із спектрів вхідного і вихідного сигналів. Згідно з означенням частотна передатна функція (ЧПФ)

$$W(j\omega) = \frac{S_y(j\omega)}{S_x(j\omega)}, \quad (9)$$

де  $S_x(j\omega)$ ,  $S_y(j\omega)$  – спектри відповідно вхідного і вихідного сигналів об'єкта. З ЧПФ одержують АЧХ і ФЧХ згідно з (8), а імпульсну характеристику об'єкта визначають зворотним перетворенням Фур'є частотної передатної функції, яке виглядає так:

$$p(nT) = \sum_{k=0}^{N-1} \dot{W}(k\Omega) \exp(j2\pi nk/N). \quad (10)$$

Перехідну характеристику знаходять інтегруванням імпульсної характеристики в (6).

Спектрально-статистичний метод вимірювання витікає безпосередньо з формули (3). Дійсно, перетворення Фур'є виразу (3), який являє собою інтеграл згортки, дає добуток зображень підінтегральних функцій:

$$\dot{G}_{xy}(\omega) = G_{xx}(\omega) \cdot \dot{W}(\omega), \quad (11)$$

де  $\dot{G}_{xy}(\omega)$ ,  $G_{xx}(\omega)$  – відповідно взаємний спектр сигналів і енергетичний спектр вхідного сигналу. З виразу (11) одержуємо формулу для роз-

рахунку частотної передатної функції у вигляді

$$\dot{W}(\omega) = G_{xy}(\omega) / G_{xx}(\omega), \quad (12)$$

звідки усі інші частотні і часові характеристики одержують так, як і в спектральному методі.

Узагальнену структуру вимірювальної системи незалежно від методу вимірювання можна представити у вигляді пристрою вимірювання сигналів (куди входять генератор сигналу, об'єкт, аналогово-цифрові перетворювачі і перемикач) та пристрій обробки даних. Для обробки цифрових даних, одержаних від пристрою вимірювання сигналів, на першому етапі зручно скористатись персональною ЕОМ (рис. 3).

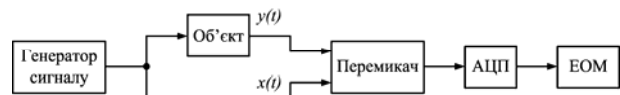


Рис. 3. Структурна схема системи вимірювання

Для порівняльного дослідження розглянутих методів створена імітаційна програмна модель вимірювальної системи. Вікно програми, показане на рис. 4. Програма дозволяє вибрати метод вимірювання, вид вимірювального сигналу, характеристику об'єкта і отримати як результат похибку вимірювання вибраної характеристики заданим методом і заданим сигналом. Робота програми ілюструється графіками сигналу на вході і виході об'єкта, графіками вимірюваної і еталонної характеристик, а також таблицями цих характеристик.

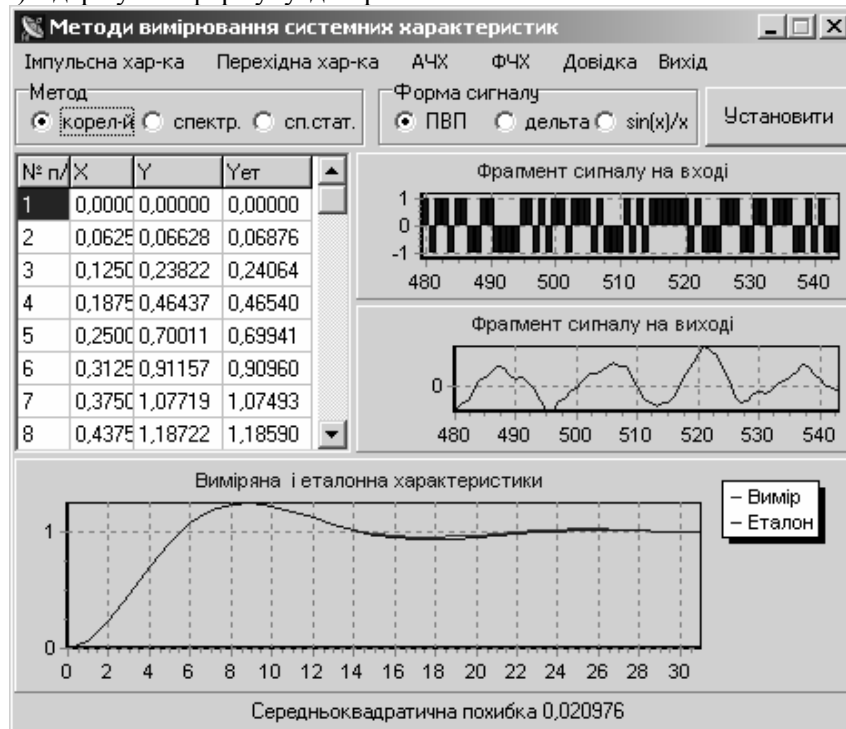


Рис. 4. Вікно програми для дослідження методів вимірювання

В якості об'єкта вимірювання взята коливальна ланка з передатною функцією

$$W(s) = \frac{k_1}{T_1^2 s^2 + 2\xi T_1 s + 1}, \quad 0 < \xi < 1 \quad (13)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт підсилення,  $T_1$  – постійна часу,  $\xi$  – коефіцієнт демпфірування.

Розрахункові (еталонні) характеристики об'єкта визначаються такими формулами:

– імпульсна характеристика

$$p(t) = \frac{k_1}{T_1 \sqrt{1-\xi^2}} \exp(-k_1 t/T_1) \sin \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T_1} t, \quad t \geq 0 \quad (14)$$

– перехідна характеристика

$$h(t) = k_1 \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \exp(-k_1 t/T_1) \times \sin \left( \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T_1} t + \varphi_1 \right) \right], \quad (15)$$

де  $\varphi_1 = \arctg \sqrt{1-\xi^2} / \xi, \quad t \geq 0$

– амплітудно-частотна характеристика

$$A(\omega) = k_1 / \sqrt{(1-T_1^2 \omega^2)^2 + 4\xi^2 T_1^2 \omega^2}, \quad (16)$$

– фазово-частотна характеристика

$$\varphi(\omega) = -\arctg \left[ 2\xi T_1 \omega / (1-T_1^2 \omega^2) \right]. \quad (17)$$

Цифрова модель об'єкта вимірювання, знайдена методом інваріантної імпульсної характеристики, представлена різницеvim рівнянням у такому вигляді [4, 5]:

$$y_n = a_1 x_{n-1} + b_1 y_{n-1} + b_2 y_{n-2}, \quad (18)$$

де  $a_1 = k_p \exp(-\alpha T) \sin \omega_p T$ ,

$$b_1 = 2 \exp(-\alpha T) \cos \omega_p T, \quad b_2 = -\exp(-2\alpha T),$$

$$\omega_p = \sqrt{1-\xi^2} / T_1, \quad k_p = k_1 / \omega_p T_1^2, \quad \alpha = \xi / T_1,$$

$T$  – інтервал дискретизації.

В імітаційному експерименті прийняті такі значення параметрів: коефіцієнт підсилення  $k_1 = 1$ , постійна часу  $T_1 = 1/2\pi$  с., коефіцієнт демпфірування  $\xi = 0,4$ . При цьому частота спряження  $F_1 = 1$  Гц. Гранична частота ланки прийнята рівною  $F_{гп} = 4F_1 = 4$  Гц, а частота дискретизації  $F = 4F_{гп} = 16$ . Перша гармоніка сигналу  $dF = F/L$ . Швидкість передачі  $B = 1/T$  Бод, де  $T$  – інтервал дискретизації. При цьому швидкість передачі  $B$  чисельно рівна частоті дискретизації  $F$ .

Таблиця 1

Результати вимірювання середньоквадратичної похибки, %

Метод	Сигнал	Імпульсна хар-ка	Перехідна хар-ка	АЧХ	ФЧХ
Кореляційний	ПВП	4,17	2,10	4,45	6,55
	Дельта	0,00	0,17	1,42	2,39
	$\sin(x)/x$	0,08	0,17	1,41	2,29
Спектральний	ПВП	5,48	7,76	8,31	7,27
	Дельта	0,000	0,12	2,13	1,18
	$\sin(x)/x$	0,003	0,12	2,12	1,18
Спектрально-статист.	ПВП	5,54	7,34	8,62	6,82
	Дельта	0,03	1,64	1,50	0,9
	$\sin(x)/x$	0,003	1,62	0,92	1,18

В якості вимірювального сигналу використана регістрова псевдовипадкова М-последовність (ПВП) двополярних коротких імпульсів [6]. Довжина ПВП складає  $L = 512T$ . На етапі розробки програми і її тестування було виявлено, що для прийнятної точності вимірювання детермінованим сигналом, форма останнього повинна наближатись до дельта-імпульсу. Тому в імітаційний експеримент включені тільки два види детермінованих сигналів: дельта-імпульс з довжиною  $1T$  і сигнал виду  $\sin(x)/x$  з мініма-

льною тривалістю. Мінімальний дискретний варіант цієї функції має вигляд

$$y(nT) = \begin{cases} \sin\left(\frac{\pi}{2} nT\right), & n \neq 0 \\ \frac{\pi}{2} nT, & n = 0 \\ 0, & n = 0 \end{cases}. \quad (19)$$

В цьому випадку кожний півперіод синусоїди відповідає одному інтервалу дискретизації

$T$  і довжина головного пелюстка імпульсу  $\sin(x)/x$  складає всього  $2T$ .

Вимірюються імпульсна, перехідна, амплітудно-частотна і фазово-частотна характеристики. Виміряні характеристики порівнюються з точними аналітично визначеними характеристиками. Розбіжність між ними оцінюється середньоквадратичним відхиленням.

### Результати моделювання

Результати вимірювання середньоквадратичної похибки для трьох методів вимірювання часових і частотних характеристик трьома видами широкосмугових сигналів приведені в табл. 1 і проілюстровані діаграмами на рис. 5 та рис. 6.

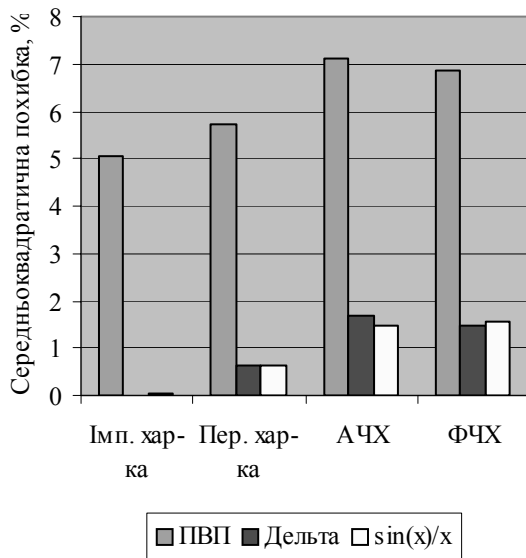


Рис. 5. Діаграми результатів вимірювання середньоквадратичної похибки відносно видів сигналу

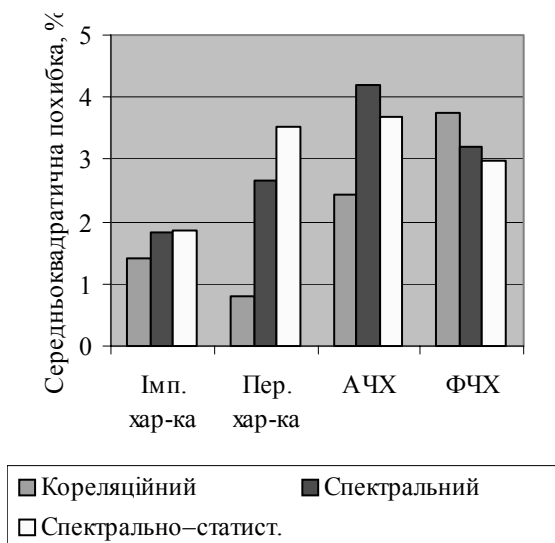


Рис. 6. Діаграми результатів вимірювання середньоквадратичної похибки відносно методів вимірювань

З результатів моделювання видно, що точність вимірювання шумоподібним сигналом поступається точності вимірювання сигналами  $\delta(x)$  і  $\sin(x)/x$  для всіх методів вимірювання (рис. 5). Розбіжність між значеннями середньоквадратичної похибки при вимірюванні сигналами виду ПВП та сигналом з найбільшою похибкою серед  $\delta(x)$  і  $\sin(x)/x$  імпульсної характеристики складає 5,03 %, перехідної характеристики 5,1 %, АЧХ 5,4 %, ФЧХ 5,3 %.

Точність вимірювання дельта-подібним сигналом і сигналом  $\sin(x)/x$  практично однакова для всіх методів вимірювання (різниця значень похибок не перевищує 0,02 %).

Точність спектрального та спектрально-статистичного методів можна прийняти приблизно рівною, оскільки при вимірюванні кожної з характеристик (ІХ, ПХ, АЧХ, ФЧХ) різниця між значеннями їх похибок менша за різницю кожного з цих методів та кореляційного методу. У табл. 2 наведені різниці між похибками при вимірюванні окремо спектральним та спектрально-статистичним методами (перший рядок табл. 2) та між похибками кореляційного методу та найближчої до значення його похибки відповідно похибки обраної з спектрального та спектрально-статистичного методів (другий рядок табл. 2) за абсолютною величиною у відсотках.

Таблиця 2

### Різниці між похибками при вимірюванні різними методами, %

Різниця між похибками методів	ІХ	ПХ	АЧХ	ФЧХ
Спектр. та спектр.-стат.	0,03	0,87	0,51	0,24
Корел. та найближча з похибок спектр. та спектр.-стат.	0,41	1,86	1,25	0,53

Слід зауважити, що значення середньоквадратичної похибки кореляційного методу вимірювання менше за відповідні значення спектрального та спектрально-статистичного методів лише при вимірюванні ІХ, ПХ та АЧХ. Як показано на рис. 6, при вимірюванні ФЧХ найменшу похибку дає спектрально-статистичний метод вимірювання.

### Висновки

На основі розробленої імітаційної моделі та проведеного моделювання показано, що опосередковані методи дозволяють одержати високу точність вимірювання системних характеристик. Це виправдовує розробку експерименталь-

ного макету системи вимірювання для дослідження точності вимірювання в натурному експерименті. При виборі сигналів слід надати перевагу дельта-подібному вимірювальному сигналу, оскільки його практична реалізація значно простіша від реалізації сигналу  $\sin(x)/x$ . З подібних міркувань при виборі методу вимірювання перевагу слід надати кореляційному методу. Заради досягнення найбільш можливої точності вимірювань за допомогою наведених методів можна рекомендувати виміри ІХ, ПХ та АЧХ здійснювати кореляційним методом, а ФЧХ – спектрально-статистичним. Такі висновки можна сприймати як рекомендації відносно реалізації реальної системи вимірювання.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) (ЦШЕОТ 0012). – К., 1998.
2. Дмитренко И. Е. Измерения и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Учеб. для вузов ж.-д. трансп. / И. Е. Дмитренко, В. В. Сапожников, Д. В. Дьяков. – М.: Транспорт, 1994. – 263 с.
3. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. - М.: Мир, 1985. – 540 с.
4. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002.- 608 с.
5. Безруков В. В. Порівняльний аналіз базових методів цифрового моделювання аналогових систем / В. В. Безруков, К. В. Гончаров, Д. Ф. Івахненко // Вісник ДПТУ ім. В. Лазаряна. Вип. 12. 2006.
6. Варакин Л. У. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М., Радио и связь, 1985. – 384 с.

Надійшла до редакції 15.09.2007.